



長年海中にあったコンクリートの中の鉄筋腐食

著者	尾崎 ？, 菅田 紀之
雑誌名	コンクリート工学年次論文報告集
巻	19
号	1
ページ	841-846
発行年	1997-06
URL	http://hdl.handle.net/10258/1493

長年海中にあったコンクリートの中の鉄筋腐食

著者	尾崎 ？, 菅田 紀之
雑誌名	コンクリート工学年次論文報告集
巻	19
号	1
ページ	841-846
発行年	1997-06
URL	http://hdl.handle.net/10258/1493

論文 長年海中にあったコンクリートの中の鉄筋腐食

尾崎 詔*¹ ・菅田紀之*²

要旨：約70年間海中にあった防波堤ケーソン壁の鉄筋コンクリートを採取し、中の鉄筋の腐食を調べた。観察およびX線回折による検討の結果、Magnetite を主成分とする黒錆の均一腐食のほか、Goethiteや Akaganiteの黄褐色錆が鉄筋表面積の約15% 存在する程度で、鉄筋の腐食重量減少率も1%程度であった。腐食に関わるコンクリート中の塩化物イオン含有量は 6 kg/m^3 と多かったが、中性化は殆ど進行しておらず、コンクリートの pH 値は表面でも11以上あり減少は少なく、表面から50mm深さでは12以上であった。
キーワード：鉄筋腐食、70年間、海水中、X線回折、腐食生成物、中性化、塩分含有量

1. はじめに

約70年間海中にあった鉄筋コンクリートについて、コンクリート内部の鉄筋腐食を中心に研究した。この鉄筋コンクリートは、北海道第一期拓殖計画およびこれに続く第二期拓殖計画によって1921～1929年に施工され、昭和の初めに竣工した浦河港の南防波堤ケーソンの壁である。[1] 防波堤の外の海水を防波堤内に引き込むために、図-1に示したようなケーソン壁の海面下0.5～3 m の一部を取り壊した際にその鉄筋コンクリートを採取し、実験試料とした。

この研究の動機は、約 60 年間海洋環境下にあった室蘭港北防波堤のコンクリートについて調べ、1986年に発表した際 [2]、コンクリート内部の塩素イオン含有量が 1.4 kg/m^3 以上と大きかったことと、鉄筋腐食厚さが 0.05 mm以下と少なかったことが気になっており、確認の機会を待っていたからである。

主たる研究の目的は鉄筋の腐食状況を知ることであり、腐食生成物も調べたが、腐食に関わるコンクリート中の塩分含有量、鉄筋を保護してきたコンクリートの中性化の程度、細孔構造、強度の他、生成物質等も調べた。その結果、コンクリートが海水中で十分な品質を維持していたので、高アルカリ環境下における鉄筋は主として塩化物イオンの存在による Magnetite 等の均一錆の存在にとどまり、腐食はさほど進展しておらず、室蘭港における調査とほぼ同様の結果が確認された。

2. 採取試料

採取した試料は厚さ230 mmで一個の重量が約 90 kgの鉄筋コンクリートの塊3個である。図-2のように $\phi 19 \text{ mm}$ の鉄筋が表面から120 mm (裏面から90 mm)のかぶり

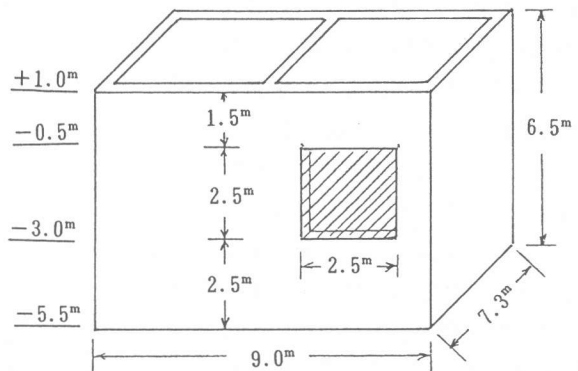


図-1 防波堤ケーソンの試料採取位置

* 1 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博（正会員）

* 2 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科、工博（正会員）

で270 mm間隔に入り、これに直角にφ12 mm 鉄筋が表面から140 mm (裏面から80mm) のかぶりで 200 mm 間隔に入っていた。

3個の塊を A,B,C の記号を付けて取り扱い、これらの鉄筋コンクリートの塊をφ19 mm 鉄筋方向と平行にダイヤモンドカッターでA1,A2,A3,A4のように4分割して実験に供した。

3. 鉄筋の腐食

コンクリートから取り出した鉄筋は腐食状況を観察した後、重量が 200g 未満になるように配慮して、直径 19mm の丸鋼を約 80 mm の長さに切断して腐食の定量分析に供した。鉄筋重量を正確に量った後、鉄筋展開図を用いて腐食面積を求めた。

鉄筋表面は安定しているように見える黒さびの均一腐食状態であったが、黄色や白色の部分的な錆も少し存在していた。

鉄筋表面の腐食生成物を調べるためにX線回折法による定性分析を行なった。黒錆を調べた鉄筋の腐食状況とX線回折のピークを図-3に示す。図のように黒錆の均一腐食は Fe_3O_4 (Magnetite) を主成分とする腐食生成物で、 FeO (Wustite) のほか、 $\alpha\text{-Fe}$ (Goethite) も存在していた。更にこの鉄筋の裏側のような黒錆の上に部分的に発生していた黄色や褐色の錆を調べたので、その腐食状況を示す写真とX線回折のピークを図-4に示す。黄色い錆の主体は $\beta\text{-FeO(OH)}$ (Akaganeite) で、 $\alpha\text{-FeO(OH)}$ (Goethite) と共存して

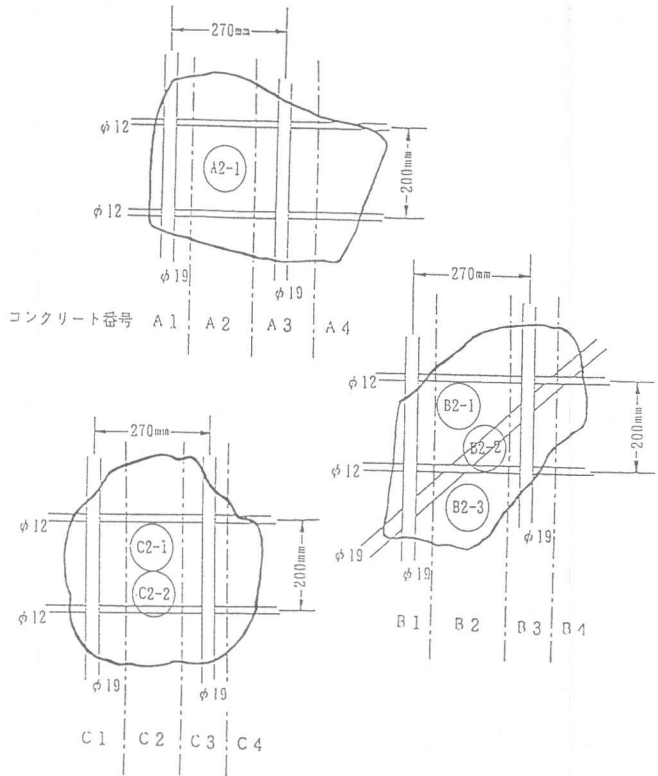


図-2 鉄筋およびコア採取状況

B-1

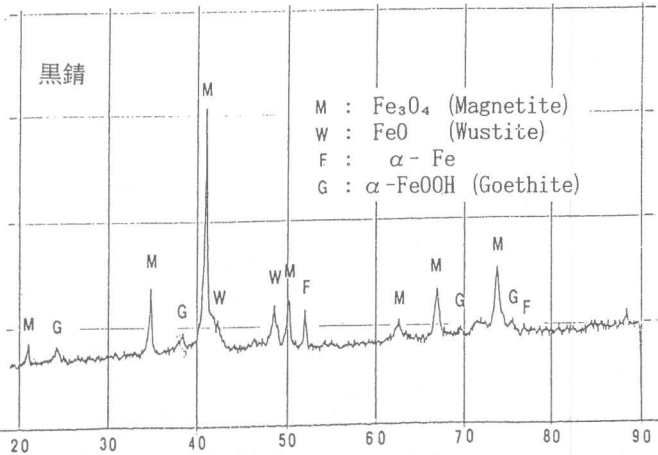
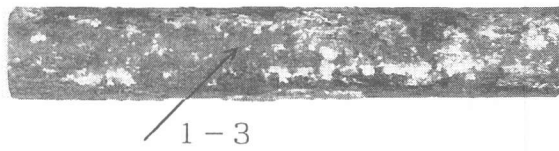


図-3 黒錆のX線回折ピーク

いた。図は省略したが、この錆を粉末にしてX線回折法で定性分析すると、 α -FeO(OH) (Goethite) や β -FeO(OH) (Akaganeite) のほか Fe_3O_4 (Magnetite) も同定された。

このほか、白色の錆も存在し、 β -FeO(OH) Akaganeite が同定されたが、粉末のX線では Fe_3O_4 (Magnetite) や FeO (Wustite) も同定された。

一方、これらの鉄筋腐食を定量的に求めた結果を表-1に示す。

鉄筋展開図の面積から求めた黒錆以外の部分的な錆の腐食面積率は約15%であった。

次に、10% クエン酸アンモニウム溶液に数日間浸漬して腐食生成物を除去し、重量測定から求めた重量減少率は約1%、これから換算した腐食厚さは0.05mm程度であった。ただし、この値は比重7.85の鋼の減少厚さを示したもので、錆を除去した前後の鉄筋直径の計測から求めた腐食厚さに比べ小さいが、表-2に示す錆の比重や空隙を考慮すると、直径の計測から求めた錆の厚さに近づく。

鉄筋の腐食の程度は、室蘭港の場合とほぼ同じであった。

4. コンクリートの中性化

フェノールフタレーン溶液による中性化深さは測定されず、コンクリートは中性化していないように見えた。そこで、微粉碎したコンクリートを50℃の温水で30分間振とうし、pH値を測定してみた。その結果は図-5のように壁の表側・裏側とも表面から50mm位迄の深さの範囲のpHが僅かながら

B-1

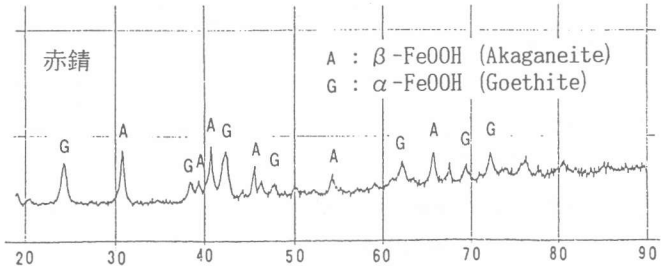
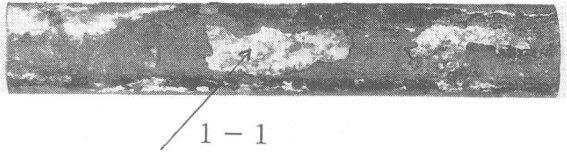


図-4 赤錆のX線回折ピーク

表-1 鉄筋の腐食結果

試料番号	重量減少 率 (%)	腐食厚さ (mm)		腐食面積 率 (%)
		重量から	直径から	
A=1 (19mm)	0.94	0.05	0.19	12.8
A-3 (19mm)	0.72	0.03	0.17	18.3
B=3 (19mm)	1.12	0.05	0.13	13.0
B=3 (12mm)	1.14	0.04	0.10	16.8

(腐食面積率には黒錆の面積は含んでいない)

表-2 同定された錆

化合物	鉱物名	色調	比重
Fe_3O_4	Magnetite	黒	5.2
FeO	Wustite	黒	5.9
α -FeOOH	Goethite	黄～褐	3.3～4.3
β -FeOOH	Akaganeite	淡褐～白	3.0
α - Fe_2O_3	Hematite	赤褐～黒	5.2

低くなっている。しかし、ケーソン壁の表面でも 11 以上の pH 値を示しており、表面からのかぶりが130mm、裏側からのかぶりが80mmの鉄筋位置におけるpH値は 12 以上で劣化に影響するような中性化は殆ど進行していなかった。

5. 塩分含有量

一方、塩分含有量については、コアーを深さ毎にスライスしたコンクリートを微粉砕し、これを試料として全塩分量を求めた。塩化物イオン含有量の試験結果を図-6に示す。壁の表側も裏側も表面付近の塩化物イオンはコンクリート重量の約 0.5% と大きく、壁の裏側からも海水が浸透したことが伺われ、深さ 50mm 位から内部も 0.2~0.3 % という高い値の一定値となっている。このことは、コンクリートの表面部に約 12kg/m³ もの塩化物イオンが存在しており、内部でも 6 kg/m³程度含まれていることを意味する。

これらの結果は室蘭港の場合の2倍以上の値となっているが、室蘭港の防波堤では可溶性塩分を測定していたことと、高炉スラグに加えて火山灰を使用していたので少なかったのだと思われる。

6. 強度と配合推定

壁の表面と直角に直径 99mm のコアーを抜き、高さ 198 mm 程度に成型した供試体による圧縮強度の平均値は 34.9 MPa であり、配

合は不明であるが、約70年経過した現在でも十分な強度を有している。そこで、コンクリートの配合を確認すべく配合推定を行なった。推定方法としてはセメント協会コンクリート専門委員会報告F-18を参考にした [3]。配合推定に必要なセメントの分析値としては、同時期に比較的近

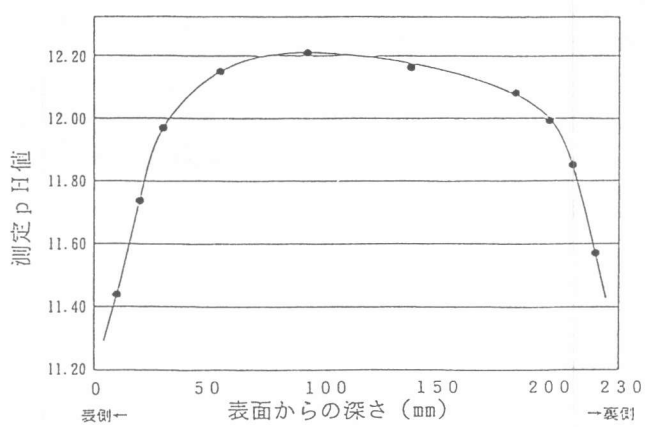


図-5 コンクリート中のpH値の分布

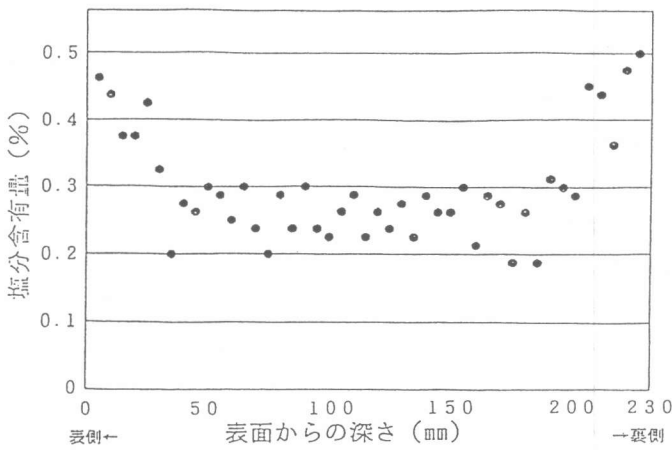


図-6 塩化物イオンの分布

表-3 コンクリートの配合推定結果

試料番号		B2-2	C2-2	平均
単位量 kg/m ³	セメント	285	295	290
	水	149	156	153
	骨 材	1964	1935	1950
水セメント比 (%)		52.2	52.8	52.5

くで工事が行なわれた室蘭港の施工記録にある鉱滓セメント（現在の高炉セメントC種に近い）分析表を参照し、石灰を $\text{CaO}=50\%$ 、強熱減量 $\text{ig. loss}=1.8\%$ と仮定して利用した [1]。骨材の分析値には強熱減量 $\text{ig. loss}=1.8\%$ 、不溶解残分 $\text{insol}=95.4\%$ 、 $\text{CaO}=0.3\%$ を使用した。その結果は、骨材の吸水率を 1% として表-3. のように、単位骨材量が 1950 kg/m^3 、単位セメント量が 290 kg/m^3 、単位水量が 153 kg/m^3 、水セメント比が 52.5% と推定された。なお、高炉スラグを用いたセメントが使用されたことは、熱分析の結果からもほぼ間違いないと思われる。

7. モルタルの細孔径分布

試料のモルタルをコンクリートから慎重に取り出し、水銀ポロシメーターによる水銀圧入法にて細孔径を調べた。表層部と中心部のコンクリート中のモルタルの細孔径分布を図-7に示す。

これを見ると中心部の全細孔量 0.060 cc/g に比べ表層部のモルタルの全細孔量の方が 0.081 cc/g と大きく、特に $0.1 \mu\text{m}$ 以下の細孔が多くなっている。これは水酸化カルシウムの溶出が原因と考えられるが劣化を促進させるほどではない。

8. モルタル空隙中の生成物

壁の表層部及び中心部のコンクリート中からモルタル部分だけを取り出し、微粉碎したものを試料として粉末X線回折法による定性分析を行った。図-8に示した結果から、ピークの大きな骨材成分を除いて判読すると、コンクリート壁の表層部では、Calsite や Ettringite が多く見られ、海水

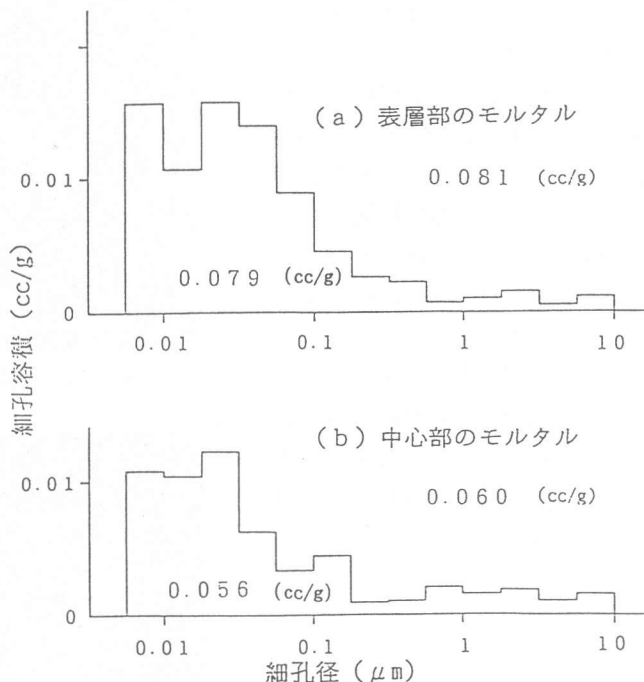


図-7 モルタル部の細孔径分布

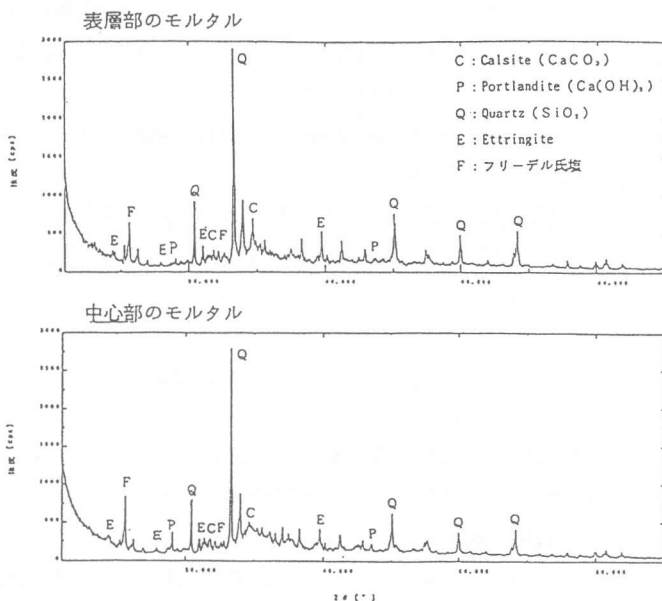


図-8 モルタルのX線回折結果

の影響をより受けたことが伺える。
また、コンクリート壁の中心部では、Friedel's 塩や Portlandite のピークが顕著に見られる。

一方、電子顕微鏡で観察した結果でも、表層部、中心部共に Ettringite がモルタルの微細な空隙中に観察され、X線回折法による結果を確認することができた。

Ettringite は、表層部では写真-1のように空隙の内側に向かって大きな結晶が発達し、中心部では写真-2のように外に向かって発達した結晶の塊が Friedel's 塩らしき六角形柱状結晶と共に空隙を埋めていた。

9. おわりに

海中に設置されたコンクリート内の鉄筋の錆について、約70年間経過した場合の事例を報告した。このようなコンクリートの場合、pH値12以上の強アルカリを維持し、 6 kg/m^3 の塩化物イオンが存在していても鉄筋はさほど腐食しておらず、錆は主として Magnetite の均一錆に Goethite や Akaganeite の部分錆が約 15 % の鉄筋面積を占め、錆による鉄筋の重量減少率は1 % 程度であった。

この調査研究を実施するに当たり、北海道開発局室蘭開発建設部浦河港建設事務所、北見工業大学、新日本製鐵㈱、日鉄セメント㈱の方々にご協力を頂きました。ここに記して深く感謝申し上げます。

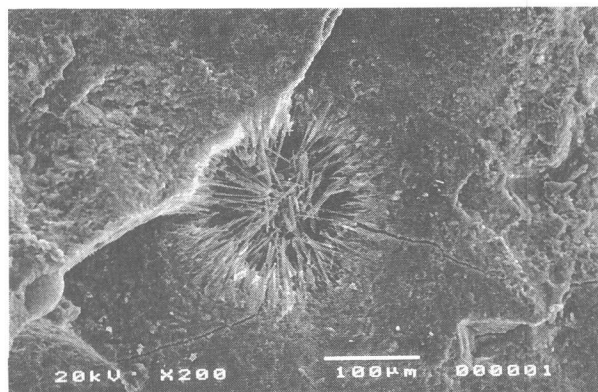


写真-1 表層部のエトリンガイト

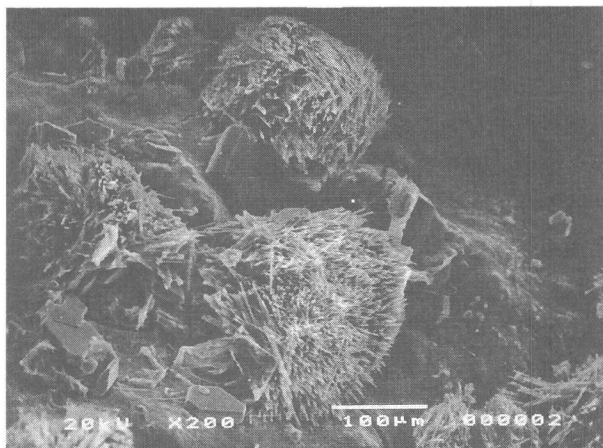


写真-2 中心部のエトリンガイトとフリーデル氏塩

参考文献

- [1] 中村廉次：北海道港湾変遷史、1960年
- [2] 尾崎 昶・松谷正憲：60年間海洋環境下にあったコンクリートについて、題8回コンクリート工学講演会論文集、pp.197～200、1986 年
- [3] セメント協会：コンクリート専門委員会報告、F-18、硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告、1967年